

ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В ГАЛАКТИКАХ: КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

О. К. Сильченко

*Государственный астрономический институт Московского
государственного университета им. М. В. Ломоносова*

В лекции будет рассказано о звездообразовании в галактиках, которое во многом определяет ход их эволюции. Основная концепция звездообразования: звезды образуются из газа в плотных молекулярных облаках. Соответственно главное, от чего зависит мгновенный темп звездообразования, — количество газа. Но темп звездообразования еще зависит и от глубины ямы гравитационного потенциала, и от момента вращения, и от стимулирующего влияния спиральных волн плотности и соседних остатков сверхновых, и от аккреции газа извне. Неудивительно, что космическая история звездообразования при этом имеет далеко не простой ход.

STAR FORMATION IN GALAXIES: A COSMOLOGICAL CONTEXT

O. K. Silchenko

*Sternberg Astronomical Institute of the Lomonosov Moscow State
University*

I would talk about star formation in galaxies which is the main driver of their evolution. The principal concept is: stars are formed from gas, in dense molecular clouds. Then the main factor determining the current star formation rate is amount of gas. But observationally the star formation rate depends also on potential well depth, on angular momentum, on triggering by spiral density waves and by nearby supernova remnants, on outer gas accretion... It is so quite clear that the cosmic star formation history is rather complex.

Введение

Основная парадигма звездообразования, согласно которой звезды образуются из газовых облаков путем их сжатия и фрагментации под действием гравитационной неустойчивости, окончательно

сформировалась в XX в. Автором парадигмы был Джеймс Хопвуд Джинс, который сформулировал ее в общем виде в 1902 г., будучи еще аспирантом. Записав систему уравнений для сферического самогравитирующего облака газа, он решил ее аналитически и вывел критерий неустойчивости: чтобы сжатие и фрагментация стали необратимы, масса облака должна быть больше «джинсовской массы», зависящей только от локальной плотности газа, а газ в процессе сжатия должен высвечивать и остывать.

Поскольку основной физический принцип джинсовской концепции — формирование звезд из газа (и чем плотнее газ, тем более эффективно должен протекать процесс) — оказался очень простым, простыми и прямолинейными были и первые, классические попытки построить количественную теорию звездообразования. Эти попытки, предпринятые в 50-е гг. XX в., оказались очень успешными. Мартин Шмидт ввел закон, позднее названный «законом Шмидта», согласно которому локальные темпы звездообразования пропорциональны квадрату объемной плотности газа в этом месте [1]. Частично закон Шмидта был основан на прямых подсчетах молодых звезд в окрестностях Солнца и радионаблюдениях нейтрального водорода на длине волны 21 см, частично — на рассуждениях о том, что, поскольку газовый диск Галактики (имелся в виду именно нейтральный водород, молекулярного газа тогда еще не наблюдали) примерно в три раза толще распределения ОВ-звезд, зависимость темпов звездообразования от плотности газа не может быть линейной. «Пусть она будет квадратичной», — сказал Шмидт [2]. Впрочем, на том же симпозиуме МАС прозвучали голоса и за линейную зависимость, например, голос Эдвина Солпитера, автора первой, классической и также крайне успешной оценки начальной функции масс звезд [3]; и аргументы Солпитера тоже были общезначимые.

Интересно, что тогда не встал вопрос о пространственных масштабах применимости закона Шмидта: хотя все наблюдательные основания как закона Шмидта, так и начальной функции масс Солпитера были получены для непосредственных окрестностей Солнца, классики тут же начали применять эти законы для описания эволюции галактик в целом. В дискуссии после доклада Шмидта на вышеупомянутом симпозиуме МАС обсуждалось, можно ли описать с помощью закона Шмидта непрерывное формирование разных звездных населений Млечного Пути — сначала населения II типа (звездного гало Галактики), а потом населения I типа (диска).

Много глубоких идей и классических результатов в теорию звездообразования внес Ричард Ларсон в 60—80-е гг. XX в. [4–10]. В 80-е гг. уже было понятно, что звезды формируются в молекулярных облаках, и соответственно темпы и характеристики звездообразования должны зависеть именно от свойств (и количества) молекулярного газа. Однако, поскольку молекулярные облака считались короткоживущими из-за их концентрации к спиральным рукавам, темпы формирования молекулярных облаков опять-таки привязывались к плотности нейтрального водорода в диске галактики и закон Шмидта продолжал жить и побеждать. Однако Ларсон призывал усложнить картину и кроме прямой привязки темпов звездообразования к количеству газа учесть еще и весь комплекс динамических свойств дисков галактик: плотность распределения гравитирующего вещества (глубину потенциальной ямы) и так называемый шир (shear), связанный с дифференциальным вращением газа в диске, поскольку условия для гравитационной неустойчивости газового облака в реальности зависят не только от его массы и плотности, но и от его окружения. Джинс-то свои уравнения записывал для *изолированного* (и сферического) облака!

Что определяет темпы звездообразования

Наблюдательную основу под физику глобального звездообразования в галактиках заложил Роберт Кенникат. Начинал он как специалист по областям звездообразования в близких галактиках — огромным комплексам молодых звезд и ионизованного ими газа. Уже очень рано он предложил определять темпы звездообразования в галактиках по их интегральному излучению в эмиссионной линии $\text{H}\alpha$, поскольку интегральный поток в эмиссии коррелировал с количеством отдельных зон Стремгрена вокруг молодых звезд в галактиках, хорошо разрешаемых на такие отдельные области. Каждая зона Стремгрена содержит в себе массивную короткоживущую звезду, живую свидетельницу текущего звездообразования. Любопытно, что в своей ранней знаменитой работе [11] Кенникат указывал на крайне *слабую* корреляцию темпов звездообразования с плотностью газа (как и с массой галактики). Однако вскоре его точка зрения поменялась. В эпохальной работе 1989 г. [12] он по наблюдательным данным о распределении эмиссии $\text{H}\alpha$ в дисках 15 спиральных галактик подтверждает закон Шмидта — степенную зависимость локальных темпов звездообразования от плотности газа как для ней-

трального водорода, так и для «полной плотности газа», куда он суммировал молекулярный газ и гелий. Однако, несмотря на прямое упоминание закона Шмидта в абстракте статьи [12], показатель степени в найденной Кенникатом наблюдательной зависимости оказался не двойка, а $N = 1.3 \pm 0.3$, т. е. зависимость, вообще говоря, ближе к линейной, чем к квадратичной, на радость модельерам эволюции галактик.

Ну и, конечно, надо подчеркнуть, что поскольку Кенникат анализировал не нашу Галактику, а другие спиральные галактики, он оперировал не *объемной*, а *поверхностной* плотностью газа. Особенностью найденного им «закона звездообразования в галактических дисках» являлось также существование пороговой плотности газа, ниже которой закон Шмидта не выполнялся и вообще звездообразование затухало. Однако в каждой конкретной галактике эта пороговая плотность почему-то была своей: по выборке из 20 объектов диапазон значений пороговых плотностей газа получился от 3 до 12 масс Солнца на квадратный парсек. Существование такого порога плотности газа Кенникат связал с условием наступления гравитационной неустойчивости в газе, и тогда понятно, что общая динамика галактики тоже должна на него влиять, потому пороги разные в разных галактиках. В 1998 г. вышла еще одна знаменитая статья Кенниката [13]: уже по выборке из 61 галактики он уточнил $N = 1.4 \pm 0.15$. Значит, не нашим и не вашим, а показатель степени — полтора как Ларсон и Эльмегрин из простейших самогравитирующих моделей получали? В этой же статье Кенникат соглашался и на возможную заметную роль длительности характерного динамического времени, пропорционального периоду обращения диска галактики на данном радиусе: закон $\text{SFR} \propto \Sigma_{\text{gas}} \Omega(\text{gas})$ описывал данные лишь немногим хуже, чем $\text{SFR} \propto \Sigma_{\text{gas}}^{1.5}$.

Однако исследователей мучила непрямая связь между локальным распределением плотности нейтрального водорода и молекулярного газа; к 2000-м гг., после успехов интерферометрических наблюдений, которые позволили построить в галактиках детальные распределения молекулярного газа с пространственным разрешением, сравнимым с разрешением фотометрических наблюдений, в умах исследователей созрела революция: надо сравнивать локальные темпы звездообразования именно с локальным количеством молекулярного газа. В 2008 г. Бигбель со товарищи [14] показали, что темпы звездообразования отлично коррелируют с поверхностной плотностью молекулярного газа в первой степени, — четкая линейная связь! Ни-

какого порогового значения плотности для поджига звездообразования у молекулярного газа нет [15]! А еще раньше Гао и Соломон [16] продемонстрировали, что темпы звездообразования еще лучше, чем с CO, коррелируют с плотностью *очень плотного* молекулярного газа, измеряемого по линии молекулы HCN, и степень зависимости с плотностью этого самого плотного газа при этом тоже единица!

Живой, однако, осталась и идея о глобальном регулировании темпов звездообразования, связанном с динамическими свойствами галактики как целого. Действительно, если смотреть только на количество молекулярного газа, то эффективность звездообразования получается разной в галактиках так называемой «главной последовательности» (это подавляющее большинство дисковых галактик, у которых темпы звездообразования плавно меняются во времени и пропорциональны их звездной массе) и в галактиках с мощными вспышками звездообразования, такими, как ULIRG в местной Вселенной или субмиллиметровые галактики на красных смещениях 2—3 [17]. Однако если подключить сюда динамику, то можно составить единую последовательность $SFR \propto M_{gas}/\tau_{dyn}$ для всех галактик на разных красных смещениях. Интерпретация τ_{dyn} у разных теоретиков пока не устоялась: некоторые [13, 17] предпочитают орбитальный период во внешних областях галактики, некоторые (Крумхольц, например, [18]) — так называемое free-fall время, связанное с турбулентностью газа, но и старый добрый shear тоже никто не сбрасывает со счетов (команда Тана, например [19]).

И наконец, есть еще один критический момент, связанный с тем, что молекулярные облака, формирующие звезды, никак не могут считаться изолированными. Они не только самогравитирующие, они еще и находятся во внешнем гравитационном поле галактики. В больших спиральных галактиках в экваториальной плоскости диска доминирующим гравитирующим агентом является звездный компонент диска. Поэтому естественным выглядит предложение и обоснование «расширенного закона Шмидта» (extended Schmidt law), в котором локальные темпы звездообразования зависят не только от локальной плотности газа в некоей степени, но и от локальной плотности звезд, тоже в некоей, уже другой степени. Калибровки расширенного закона Шмидта с наблюдательными данными показали, что степень при поверхностной плотности звезд должна быть около 0.5 (квадратный корень) [20–22].

«Нормальное» звездообразование и «вспышки» звездообразования

Для того чтобы измерить темпы звездообразования в галактике, нужно пересчитать в ней молодые звезды. Самый простой подход к этой задаче — пересчитать *массивные* звезды, потому что массивные звезды живут мало, не больше двух-трех десятков миллионов лет, и по их количеству можно оценить, каковы были темпы звездообразования именно в течение этих недавних десятков миллионов лет. Но как пересчитать массивные звезды в далеких галактиках, которые не разрешаются в наблюдениях на отдельные звезды? В интегральном излучении галактик есть «индикаторы», которые позволяют оценить вклад массивных звезд в полное излучение галактики. Один из таких индикаторов был упомянут в предыдущем параграфе: это интегральное излучение в эмиссионной линии $H\alpha$. Зоны Стремгrena (области ионизованного теплого газа, излучающего в эмиссионных линиях, и прежде всего в водородных эмиссионных линиях) образуются только вокруг массивных звезд, массивнее 8—10 масс Солнца; следовательно, интегральный поток в эмиссионной линии $H\alpha$ прямо пропорционален количеству таких массивных звезд и, при фиксированной начальной функции масс звезд, полному текущему темпу звездообразования. Можно еще измерить поток от галактики в ультрафиолете, — туда вкладывают звезды, начитая с трех масс Солнца; следовательно, по интегральному потоку в ультрафиолете можно оценить средние темпы звездообразования в последние 100—200 млн лет.

Когда в 80-е гг. впервые со спутника IRAS был произведен обзор неба в четырех далеких инфракрасных полосах, недоступных наблюдениям с Земли, неожиданно выяснилось, что самые мощные события звездообразования плохо видны в оптике и в ультрафиолете, зато светят как фонари на 25, 60 и 100 мкм. Понятно, что данное излучение уже не принадлежит массивным звездам; это излучение пыли, нагретой самыми массивными звездами. Парадокс Вселенной состоит в том, что самые мощные вспышки звездообразования всегда сидят в пылевых коконах, поглощающих львиную долю их ультрафиолета. Поэтому самая честная оценка интенсивности звездообразования в галактике — комбинированная, а именно сумма оценок по ультрафиолету и по далекому инфракрасному излучению: часть ультрафиолета от массивных звезд до нас доходит напрямую, остальное поглощается и переизлучается пылью. Галактики с самым интенсив-

ным звездообразованием в ближней Вселенной, обнаруженные впервые как раз спутником IRAS, называются ULIRG (Ultra-Luminous InfraRed Galaxies). Это очень массивные галактики, как правило, с возмущенной структурой, вероятно, находящиеся в данный момент в процессе слияния; и все их интенсивное звездообразование, сотни масс Солнца в год, сосредоточено в компактной области, в центральном килопарсеке. В ближней Вселенной ULIRG — это галактики со вспышкой звездообразования: их текущие темпы звездообразования в разы или даже на порядок превосходят темпы звездообразования, средние за время их жизни. Причиной такого резкого и, вероятно, кратковременного повышения темпов звездообразования считается нарушение равновесия в газовом диске, спровоцированное бурной динамикой слияния галактик.

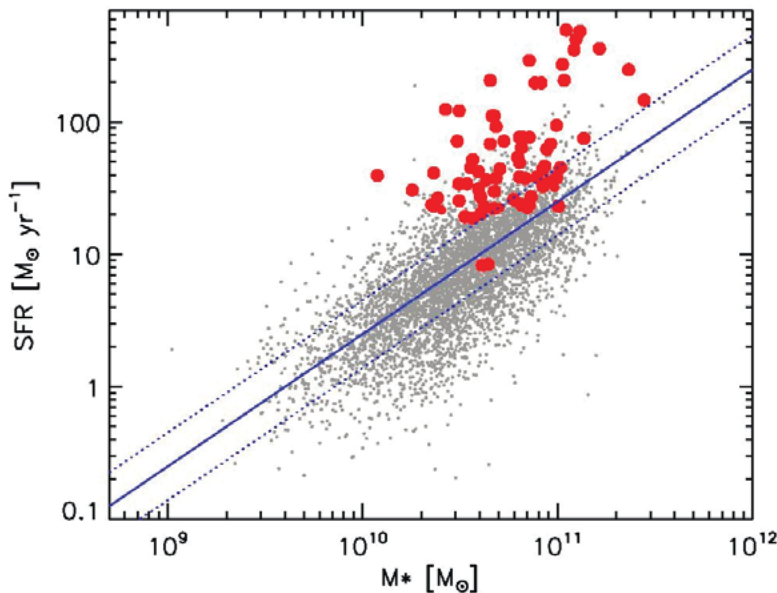


Рис. 1. Главная последовательность звездообразующих галактик и «выпадающие» случаи. Рисунок взят из статьи [23]

И вот тут чуть подробнее про уже упоминавшуюся «главную последовательность» звездообразующих галактик. О ней заговорили, когда для ближней Вселенной померили темпы звездообразования в десятках тысяч галактик — когда пошли массовые фотометрические обзоры галактик. Первым, и до сих пор главным, обзором ближней

Вселенной является SDSS (Sloan Digital Sky Survey), обеспечивший многоцветную фотометрию и спектры центральных областей для сотен тысяч галактик на четверти небесной сферы до красного смещения 0.2. К 2010 г. центр обработки данных SDSS в Мюнхене закончил и выпустил 7-й релиз, который включал не только измеренные потоки в разных длинах волн, но и результаты подгонки этих потоков самыми разными моделями. Впервые появились такие массовые таблицы свойств звездных населений, свойств возбуждения и химического состава газа, и темпов звездообразования, определенных по потоку в эмиссии H α . И тут обнаружилось с весьма весомой статистической убедительностью, что темпы звездообразования в большинстве галактик примерно пропорциональны их звездной («фотометрической») массе [24]. Такая зависимость указывает на плавно спадающую историю звездообразования, которая хорошо приближается экспонентой. Узкую зависимость, связывающую текущие темпы звездообразования и звездную массу галактик, назвали «главной последовательностью»; аналогия со звездами тут была такая: большая часть звезд тоже сидит на главной последовательности, и это самая «спокойная» стадия эволюции, без взрывов и вспышек. Позже последовало массовое измерение темпов звездообразования в близких галактиках по ультрафиолету, когда эти данные были получены в обзоре неба космическим телескопом GALEX. И снова большинство галактик оказалось на тесной, узкой «главной последовательности» [25, 26]. Пример этого распределения можно увидеть на рис. 1. Видно, что, кроме большинства галактик на главной последовательности, существуют еще немногочисленные компактные звездообразующие галактики, расположенные *выше* главной последовательности: в ближней Вселенной это ULIRG, галактики со вспышками звездообразования.

Интересно, что когда появились массовые измерения темпов звездообразования в галактиках на более далеких красных смещениях — сначала до $z = 1$, а потом и до $z \approx 3$, оказалось, что главная последовательность звездообразующих галактик сохраняется и там, на ранних стадиях эволюции Вселенной. Огромный вклад в измерения темпов звездообразования в далеких галактиках внес космический телескоп Herschel. Это был инфракрасный охлаждаемый космический телескоп с огромным зеркалом 3.5 м, и он измерял излучение галактик на длинах волн десятки и даже сотни микрон. Поскольку в лабораторной системе длин волн максимум излучения пыли, нагретой молодыми звездами, приходится на 100 мкм, наблюдения

телескопа Herschel позволили массово измерять темпы звездообразования по инфракрасному излучению пыли в галактиках вплоть до красного смещения 3—4. Оказалось, что главная последовательность как узкая зависимость между темпами звездообразования и звездной массой галактики сохраняется на больших красных смещениях, но сдвигается вверх! При той же массе галактики на $z = 1$ или $z = 2$ образуют звезды в несколько раз интенсивнее [27]. Параллельно изменяется с красным смещением и так называемое время истощения газа — частное от деления массы молекулярного газа на темп звездообразования в галактике. Если в ближней Вселенной у всех спиральных галактик, независимо от их массы и газового запаса, это время истощения около 2 млрд лет, то на красном смещении двойка — это уже всего полмиллиарда лет [28]! Но тесная зависимость между массой галактики и темпами звездообразования сохраняется. Немногочисленные галактики на $z = 2$ —3 «выпрыгивают» вверх от главной последовательности. Это так называемые субмиллиметровые галактики (SMG) — такие же массивные, как ULIRG, от ста миллиардов солнечных масс, только в звездной компоненте, и с такой же возмущенной морфологией; их также трактуют как продукт текущего слияния двух массивных галактик, богатых газом. Но основной вклад в полную «космическую» плотность звездообразования вносят все же не они, а куда более многочисленные галактики главной последовательности.

Космическая история звездообразования

Что такое «космическая история звездообразования»? Это изменение со временем, т. е. эволюция, суммарных темпов звездообразования во всех галактиках, заполняющих сопутствующую единицу объема Вселенной, например, в кубическом Мегапарсеке. Первый подход к оценке темпов звездообразования во всей Вселенной состоялся в середине 90-х гг. XX в., когда были обнародованы первые результаты «ковровых» обзоров далеких галактик. Еще до вступления в строй 8-метровых телескопов высокотехнологичный 3.6-метровый CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope), установленный в обсерватории с прекрасным астроклиматом на горе Мауна Кеа на Гавайях, вел фотометрические и спектральные измерения полных выборок слабых галактик в избранных площадках. Таким образом были получены данные по эволюции функций светимости галактик вплоть до красного смещения $z = 1$ в нескольких широкополосных филь-

трах, относящихся к оптическому диапазону спектра [29–31]. И тут Пьеро Мадау со товарищи обратили внимание, что на красном смещении единица в голубой фильтр В на Земле уже въезжает ближний ультрафиолет в собственной системе длин волн галактики; а значит, просуммировав в фиксированном объеме все далекие галактики, светимость которых измерена на Земле в фильтре В, можно получить суммарный поток в ультрафиолете на красном смещении единица и по нему оценить плотность темпов звездообразования во Вселенной в ту далекую эпоху. Таким образом была получена первая оценка космической истории звездообразования [32]. И эта первая оценка сразу поразила астрономов: оказалось, что «космические темпы звездообразования» — суммарный темп формирования звезд в единице объема пространства в 1 кубический мегапарсек — падали почти вертикально последние 8 млрд лет: от $z = 1$ до $z = 0$ они упали в 7–10 раз. Далее Мадау с соавторами привлекли дополнительные данные и использовали дополнительные подходы (в частности, дифференциальные подсчеты галактик на 2 мкм, чтобы отследить нарастание массы звездного населения со временем) и построили космическую историю звездообразования уже до красного смещения 4 [33]; у них получилось, что максимум космической истории звездообразования приходится на $z = 1.5$, а далее, к более ранним эпохам, плотность темпов звездообразования падает.

Эти результаты получили большой резонанс в астрономическом сообществе; но и сомнения в правильности ранней космической истории звездообразования, в первые 3–4 млрд лет жизни Вселенной, нарисованной в [33], тоже были сильные и обоснованные. Дело в том, что еще в 90-е гг. появились результаты обзоров эллиптических галактик вплоть до красных смещений 0.5–1.0; и уже было известно, по измеренным темпам эволюции цвета этих галактик без звездообразования, что их старое звездное население было полностью сформировано к красному смещению 2–2.5. Таким образом, специалисты по звездному населению галактик предсказывали эпоху — короткую и раннюю, когда все массивные галактики ранних типов дружно формировали за время, меньшее 1 млрд лет, свои 100 млрд звезд каждая. Эту эпоху относили на $z \geq 3$. Данные предсказания никак не согласовывались с максимумом $SFR(z)$ на $z = 1.5$ и ее падением в сторону больших z . Претензии к методике Мадау были высказаны практически сразу: он никак не учитывал пыль на больших красных смещениях, которая должна была экранировать подсчеты далеких галактик. С одной стороны, он довольно логично оправдывал такой

подход: на ранних этапах эволюции, по логике развития нуклеосинтеза во Вселенной, металлов в газе было мало и пыли не из чего было формироваться. С другой стороны, было известно о существовании довольно заметного инфракрасного космического фона, и его также вполне логично приписывали пыли в неразрешенных далеких галактиках. Исправленная за пыль космическая история звездообразования уже казалась совершенно плоской на $z > 1.5$!

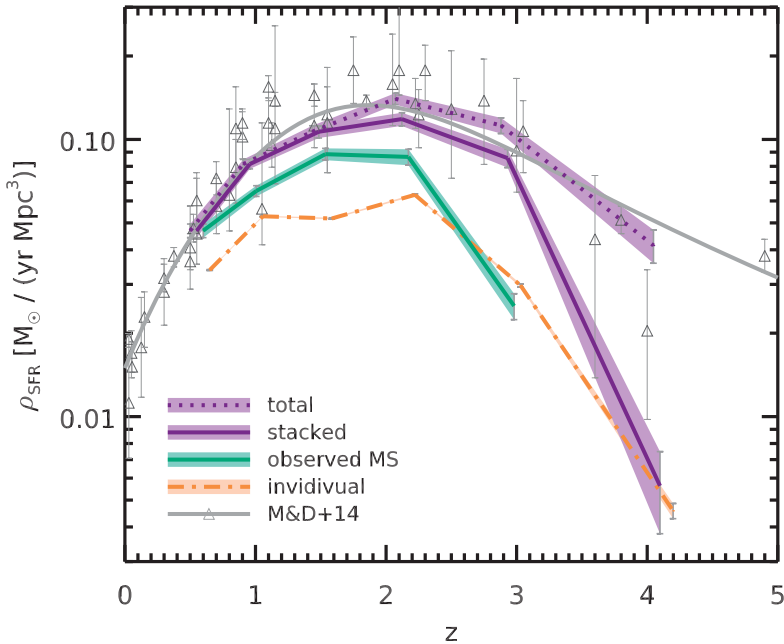


Рис. 2. Космическая история звездообразования, основанная на данных телескопа «Гершель». Рисунок взят из статьи [34]

Решающий вклад в исследование звездообразования на высоких красных смещениях вплоть до 3—4 внес инфракрасный космический телескоп «Гершель», запущенный Европейским космическим агентством в 2009 г. и проработавший при охлаждении жидким гелием вплоть до 2013 г. Телескоп «Гершель» был ориентирован на наблюдения в далеком инфракрасном диапазоне, от 60 мкм до субмиллиметров; комплекс его инструментов позволял строить распределения энергии в спектрах далеких галактик, относящиеся к пыли, нагретой звездообразованием. Именно после поступления результатов с

«Гершеля» был откалиброван и стал самым популярным индикатором темпов звездообразования суммарный поток в инфракрасном диапазоне, L_{tot} , который получался интегрированием распределения энергии в спектре в диапазоне от 8 до 1000 мкм [35]. «Гершель» в ходе 4 лет работы покрыл обзором примерно 10 % всей небесной сферы, и это были не случайно выбранные 10 %. Целенаправленно наблюдались площадки, для которых уже существовали глубокие многоцветные изображения в оптике: площадки обзоров GOODS, CANDELS, COSMOS. Наличие изображений высокого разрешения, полученных в том числе на Хаббловском космическом телескопе, облегчало отождествление инфракрасных источников «Гершеля» и позволяло строить для индивидуальных объектов распределения энергии в полном диапазоне электромагнитного излучения, что, в свою очередь, обеспечивало уверенные оценки как темпов звездообразования, так и красных смещений и звездных масс галактик. Были измерены десятки тысяч галактик в диапазоне красных смещений от 0 до 4! Окончательные результаты по оценке космической истории звездообразования для этого диапазона красных смещений представлены в [34]; обзор Мадау и Дикинсона по этим новым данным был годом раньше опубликован в Annual Reviews A&A [36].

Вселенная образовывала звезды с примерно постоянным темпом между $z = 3$ и $z = 1$, на уровне 0.1 масс Солнца в год в одном кубическом мегапарсеке сопутствующего объема. Абсолютный максимум плотности темпов звездообразования достигается вблизи $z = 2$. На $z < 1$ и в интервале $z = 3-4$ наблюдается почти симметричный завал темпов звездообразования (правда, надо помнить, что между $z = 4$ и $z = 3$ прошел один миллиард лет, а между $z = 1$ и $z = 0$ — восемь!). Надо сказать, что плавное уменьшение плотности темпов звездообразования к началу времен сейчас прослеживается примерно до $z = 10$ [37]. И вплоть до $z = 5$ уже хватает статистики измеренных галактик, чтобы проследить эволюцию «главной последовательности» — почти линейной связи между темпом звездообразования и звездной массой галактики. Именно этот эпохальный результат позволил окончательно убедиться, что равноправные слияния галактик (большой мерджинг) — и сопровождающие их вспышки звездообразования — вносят пренебрежимо мало в космическую историю звездообразования. Основная мода звездообразования в га-

лактиках — плавная, требующая ламинарной постоянной подпитки газом извне. Отсюда и окончательная победа картины эволюции дисковых галактик с необходимостью постоянной аккреции внешнего холодного газа.

Библиографические ссылки

1. *Schmidt M.* The Rate of Star Formation // *Astrophys. J.* — 1959. — Vol. 129. — P. 243.
2. *Schmidt M.* Derivation of the initial luminosity function and the past rate of star formation // *The Hertzsprung-Russell Diagram* / ed. by Jesse Leonard Greenstein : IAU Symp. — 1959. — Vol. 10. — P. 99.
3. *Salpeter E. E.* The Luminosity Function and Stellar Evolution // *Astrophys. J.* — 1955. — Vol. 121. — P. 161.
4. *Larson R. B.* Numerical calculations of the dynamics of collapsing protostar // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1969. — Vol. 145. — P. 271.
5. *Larson R. B.* The evolution of spherical protostars with masses 0.25 M_{solar} to 10 M_{solar} // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1972. — Vol. 157. — P. 121.
6. *Larson R. B.* Calculations of three-dimensional collapse and fragmentation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1978. — Vol. 184. — P. 69–85.
7. *Larson R. B.* Turbulence and star formation in molecular clouds // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1981. — Vol. 194. — P. 809–826.
8. *Larson R. B.* Mass spectra of young stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1982. — Vol. 200. — P. 159–174.
9. *Larson R. B.* Gravitational torques and star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1984. — Vol. 206. — P. 197–207.
10. *Larson R. B.* Cloud fragmentation and stellar masses // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1985. — Vol. 214. — P. 379–398.
11. *Kennicutt Jr., R. C.* The rate of star formation in normal disk galaxies // *Astrophys. J.* — 1983. — Vol. 272. — P. 54–67.
12. *Kennicutt Jr., R. C.* The Star Formation Law in Galactic Disks // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 344. — P. 685.
13. *Kennicutt Jr., R. C.* The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 498, № 2. — P. 541–552. [astro-ph/9712213](#).
14. *Bigiel F., Leroy A., Walter F. et al.* The Star Formation Law in Nearby Galaxies on Sub-Kpc Scales // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136, № 6. — P. 2846–2871. [0810.2541](#).

15. *Schruba A., Leroy A. K., Walter F. et al.* A Molecular Star Formation Law in the Atomic-gas-dominated Regime in Nearby Galaxies // *Astron. J.* — 2011. — Vol. 142, № 2. — P. 37. 1105.4605.
16. *Gao Y., Solomon P. M.* The Star Formation Rate and Dense Molecular Gas in Galaxies // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 606, № 1. — P. 271–290. astro-ph/0310339.
17. *Daddi E., Elbaz D., Walter F. et al.* Different Star Formation Laws for Disks Versus Starbursts at Low and High Redshifts // *Astrophys. J. Lett.* — 2010. — Vol. 714, № 1. — P. L118–L122. 1003.3889.
18. *Krumholz M. R., Dekel A., McKee C. F.* A Universal, Local Star Formation Law in Galactic Clouds, nearby Galaxies, High-redshift Disks, and Starbursts // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 745, № 1. — P. 69. 1109.4150.
19. *Suwannajak C., Tan J. C., Leroy A. K.* A Test of Star Formation Laws in Disk Galaxies. II. Dependence on Dynamical Properties // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 787, № 1. — P. 68. 1404.1359.
20. *Dopita M. A., Ryder S. D.* On the Law of Star Formation in Disk Galaxies // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 430. — P. 163.
21. *Shi Y., Helou G., Yan L. et al.* Extended Schmidt Law: Role of Existing Stars in Current Star Formation // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 733, № 2. — P. 87. 1103.3711.
22. *Shi Y., Yan L., Armus L. et al.* Revisiting the Extended Schmidt Law: The Important Role of Existing Stars in Regulating Star Formation // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 853, № 2. — P. 149. 1801.00888.
23. *Elbaz D., Dickinson M., Hwang H. S. et al.* GOODS-Herschel: an infrared main sequence for star-forming galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 533. — P. A119. 1105.2537.
24. *Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M. et al.* The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 351, № 4. — P. 1151–1179. astro-ph/0311060.
25. *Schiminovich D., Wyder T. K., Martin D. C. et al.* The UV-Optical Color Magnitude Diagram. II. Physical Properties and Morphological Evolution On and Off of a Star-forming Sequence // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 173, № 2. — P. 315–341. 0711.4823.
26. *Salim S., Rich R. M., Charlot S. et al.* UV Star Formation Rates in the Local Universe // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 173, № 2. — P. 267–292. 0704.3611.
27. *Noeske K. G., Weiner B. J., Faber S. M. et al.* Star Formation in AEGIS Field Galaxies since $z=1.1$: The Dominance of Gradually Declining Star Formation, and the Main Sequence of Star-forming Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* — 2007. — Vol. 660, № 1. — P. L43–L46. astro-ph/0701924.

28. *Genzel R., Tacconi L. J., Gracia-Carpio J. et al.* A study of the gas-star formation relation over cosmic time // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 407, № 4. — P. 2091–2108. 1003.5180.
29. *Lilly S. J., Le Fevre O., Crampton D. et al.* The Canada-France Redshift Survey. I. Introduction to the Survey, Photometric Catalogs, and Surface Brightness Selection Effects // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 455. — P. 50. astro-ph/9507010.
30. *Crampton D., Le Fevre O., Lilly S. J., Hammer F.* The Canada-France Redshift Survey. V. Global Properties of the Sample // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 455. — P. 96. astro-ph/9507014.
31. *Lilly S. J., Tresse L., Hammer F. et al.* The Canada-France Redshift Survey. VI. Evolution of the Galaxy Luminosity Function to z approximately 1 // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 455. — P. 108. astro-ph/9507079.
32. *Madau P., Ferguson H. C., Dickinson M. E. et al.* High-redshift galaxies in the Hubble Deep Field: colour selection and star formation history to $z \sim 4$ // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1996. — Vol. 283, № 4. — P. 1388–1404. astro-ph/9607172.
33. *Madau P., Pozzetti L., Dickinson M.* The Star Formation History of Field Galaxies // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 498, № 1. — P. 106–116. astro-ph/9708220.
34. *Schreiber C., Pannella M., Elbaz D. et al.* The Herschel view of the dominant mode of galaxy growth from $z = 4$ to the present day // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 575. — P. A74. 1409.5433.
35. *Kennicutt R. C., Evans N. J.* Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 50. — P. 531–608. 1204.3552.
36. *Madau P., Dickinson M.* Cosmic Star-Formation History // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 52. — P. 415–486. 1403.0007.
37. *Bouwens R. J., Illingworth G. D., Oesch P. A. et al.* UV Luminosity Functions at Redshifts $z = 4$ to $z = 10$: 10,000 Galaxies from HST Legacy Fields // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 803, № 1. — P. 34. 1403.4295.